
ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

УДК: 004.358
DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-725-734

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ДЛЯ ГИБРИДНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ЛИНИИ ПО СБОРКЕ СВЕТОДИОДНЫХ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

В. П. Кузьменко*, С. В. Солёный

*Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия*

**mr.konnny@gmail.com*

Аннотация. Приведен пример выбора аппаратной и программной части оборудования для создания цифрового двойника гибридной автоматизированной сборочной линии. Описаны необходимые функции цифрового двойника гибридной сборочной линии светодиодных осветительных приборов, проанализированы функции моделей программных менеджеров системы (Менеджер ресурсов, Менеджер датчиков, Менеджер компоновки среды). Приведено UML-представление модели данных цифрового двойника.

Ключевые слова: гибридная сборочная линия, сборка светодиодных осветительных приборов, цифровой двойник производственной линии

Ссылка для цитирования: Кузьменко В. П., Солёный С. В. Разработка модели цифрового двойника для гибридной производственной линии по сборке светодиодных осветительных приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 10. С. 725—734. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-725-734.

DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN MODEL FOR A HYBRID PRODUCTION LINE FOR LED LIGHTING DEVICES ASSEMBLY

V. P. Kuzmenko*, S. V. Soleniy

*St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia
mr.konnny@gmail.com*

Abstract. An example of the choice of hardware and software parts of equipment for creating a digital twin of a hybrid automated assembly line is presented. The necessary functions of the digital twin of the hybrid assembly line of LED lighting devices are described, the functions of the models of the software components of the system managers (Resource Manager, Sensor Manager, Environment Layout Manager) are analyzed. The UML representation of the digital twin data model is given.

Keywords: hybrid production line, assembly of LED lighting devices, digital twin production line

For citation: Kuzmenko V. P., Soleniy S. V. Development of a digital twin model for a hybrid production line for LED lighting devices assembly. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 10. P. 725—734 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-10-725-734.

Введение. Тенденции к персонализации выпуска серийных изделий определяют предпосылки развертывания гибких и реконфигурируемых сборочных линий и производственных систем, в результате чего появляются новые гибридные сборочные линии, которые позволяют использовать возможности как оператора (человека), так и роботов-помощников.

На глобализированном рынке отчетливо заметно стремление к более высокому уровню персонализации производимых продуктов и изделий, так называемой „кастомизации“. Однако в современных производственных системах переход к массовому „кастомизированию“ продукции порождает высокие затраты на проектирование и производство. Возможность предлагать больше вариантов для серийных моделей и быстрее внедрять новые модели ограничена современными технологиями и оборудованием для массового производства [1, 2].

Достижение гибкости и адаптивности, которые можно определить как чувствительность производственной системы к внутренним и внешним процессам, рассматривается в качестве одного из наиболее перспективных решений [3]. Однако в современных производственных системах, основанных на автоматизации технологических процессов, гибкость и возможность реконфигурации по-прежнему ограничены из-за ряда факторов [4—6]:

- жесткость используемых стационарных роботизированных линий;
- использование стационарного и специализированного оборудования для различных серий продуктов;
- использование фиксированной логики управления линий.

Мобильность, как в ресурсах, так и на уровне продукта, может сыграть существенную экономическую роль в реализации таких производственных концепций.

В последние десятилетия проведены обширные исследования в области мобильных роботизированных систем и манипуляторов. Однако возможности ставших уже традиционными промышленных решений по автоматизации не позволяют в режиме реального времени адаптировать систему и функционирование линии к динамически протекающим процессам.

Функционал большинства манипуляторов ограничен выполнением автономных запрограммированных задач, только когда они находятся в фиксированном положении — это не позволяет в полной мере использовать мобильность таких роботизированных систем.

Поэтому разрабатываются частичные решения, обеспечивающие оптимизацию производительности производственной системы за счет моделирования процессов. Развитие технологий цифрового и информационного моделирования с использованием машинного обучения привело к появлению концепции цифровых двойников (ЦД).

Однако существующие производственные инфраструктуры недостаточно развиты, чтобы поддерживать интеграцию обсуждаемой концепции гибридного производства. Использование операторов, а также различных автоматизированных устройств, таких как несколько мобильных „двуруких рабочих“ и продуктов, значительно увеличивает сложность системы. Чтобы преодолеть существующие ограничения, необходимо разработать такую инфраструктуру цифрового двойника, которая будет способна поддерживать обработку данных с разных ресурсов, а также изменение ситуации в цехе в режиме реального времени.

Предлагаемая концепция разработки и использования цифрового двойника для создания гибридной производственной линии разрабатывается с целью применения при сборке светодиодных осветительных приборов. Тем не менее, решение должно разрабатываться с учетом возможности тиражирования концепции на другие отрасли производства.

Постановка задачи. Практическая реализация описанных возможностей сопровождается внедрением технологии цифрового двойника производственной или сборочной линии, обеспечивающего взаимодействие физического оборудования и цифровых процессов. Задачи разработки цифрового двойника сборочной линии для обеспечения возможности реконфигурации системы посредством комплексного представления среды и рабочих процессов требуют:

- 1) виртуального представления сборочной линии (или целого цеха), которое обеспечит объединение данных, получаемых с датчиков, и существующих данных цифровой модели цеха;
- 2) семантического представления цеха посредством реализации единой модели данных для геометрического представления, а также состояния рабочей загруженности линии;

3) динамического обновления цифрового двойника на основе данных датчиков и ресурсов, в режиме реального времени поступающих из физического пространства.

Для того чтобы организовать качественный уровень интеграции между физическими и виртуальными процессами и устройствами, необходимо соответствующее программное решение; им может выступить свободно распространяемое программное обеспечение с открытым кодом — „операционная система для роботов“ (Robot Operating System, ROS).

ROS — это набор программных библиотек и инструментов, помогающих создавать приложения или целую операционную систему для управления роботизированными средствами драйверов. С постоянно обновляющимися современными инструментами разработчика в ROS есть все, что нужно для обеспечения взаимодействия аппаратной и цифровой частей робототехнического проекта [6—8]. ROS предлагает широкий набор форматов данных для виртуального представления различных аппаратных устройств с различными типами датчиков, а также имеет сеть сервисов для передачи собранных данных.

В разрабатываемой модели ROS может выполнять функции приложения для динамического управления роботом, основанным на цифровом моделировании и получении данных с датчиков с целью обеспечения траекторий движения манипулятора без столкновений.

Концепция гибридной сборочной линии с применением технологии ЦД предусматривает использование мобильных роботизированных платформ и манипуляторов, которые могут автономно перемещаться по цеху, выполняя множество сборочных операций (таких как погрузка, сортировка, монтаж простых элементов и т.д.), действуя в качестве помощников для операторов.

Концепция разрабатываемой модели ЦД представлена на рис. 1.

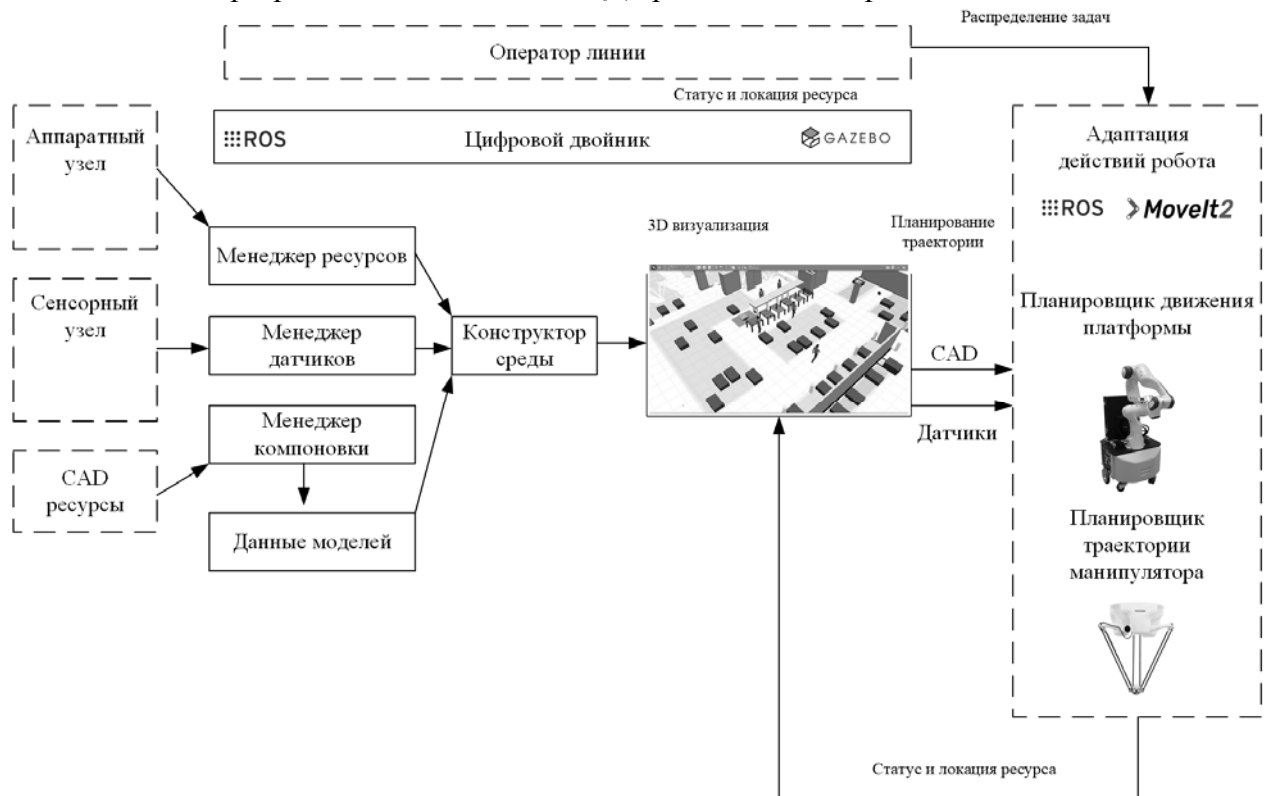


Рис. 1

Для решения этой задачи необходимо разработать модель цифрового двойника, способную в режиме реального времени виртуально представлять состояние цеха, обеспечивая следующие функциональные возможности:

— упрощенная интеграция управления и обмен данными датчиков через сервисы. Это приводит к более легкому распределению полученных данных и задач через HMI по всем

соответствующим ресурсам, таким как мобильные роботы и т.д. Интеграция осуществляется поверх ROS, задающей оболочки для всех задействованных компонентов;

— виртуальное представление цеха с использованием информации, связанной с ресурсами (Менеджер ресурсов), комбинации данных нескольких датчиков (Менеджер датчиков) и моделей САПР (Менеджер компоновки). Информация постоянно обновляется через сеть сервисов всеми ресурсами и датчиками, синтезируя все данные для обеспечения воспроизведения линии;

— единая семантическая модель данных для представления как геометрического пространства, так и состояния рабочей нагрузки. Эта модель данных должна быть достаточно общей, чтобы иметь возможность обращаться к нескольким ресурсам, а также использоваться несколькими компонентами внутри системы для принятия решений и реагирования в реальном времени.

Предлагаемое решение. Поведение робота адаптируется в режиме реального времени за счет интеграции стандартных планировщиков движения робота-манипулятора и планировщиков навигации на мобильной платформе, которые подключаются к цифровому двойнику для анализа условий в цехе и создания безопасных и свободных от коллизий траекторий во время выполнения различных производственных задач [8, 9].

В разрабатываемой концепции модели для инфраструктуры ЦД должны быть развернуты четыре программных компонента: Менеджер ресурсов; Менеджер датчиков; Менеджер компоновки; Конструктор 3D-среды.

Эти программные компоненты разрабатываются на основе ПО ROS, они обеспечивают связь между узлами сети и интеграцию с другими встроенными роботизированными приложениями. Описанную инфраструктуру ЦД возможно развернуть на различных операционных системах, как свободно распространяемых типа Ubuntu или Linux, так и на Windows или macOS, с установленной на них версией ROS 2 Foxy Fitzroy или ROS 2 Galactic.

Каждый из описанных программных компонентов желательно реализовать как узел C++, которым будет предоставлен интерфейс ROS (темы, службы, действия) для обмена соответствующей информацией.

В таблице приведены расширения файлов конфигурации, которые обрабатываются и генерируются с помощью ЦД и являются совместимыми с ROS.

Формат файла	Описание
.yaml	Синтаксис YAML, используемый для запроса и установки параметров с сервера параметров ROS. XML-файл, используется для запуска узлов ROS
.urdf	Стандартный формат для описания моделей роботов и датчиков
.sdf	Формат файла для описания объектов и окружения симуляторов роботов, таких как Gazebo ignition
.srdf	Формат файла, используемый с целью семантического описания в Moveit2 для конфигурации Планировщика движения робота

Компонент Менеджер ресурсов отвечает за регистрацию в ЦД любого нового ресурса, представленного в цехе. На основе унифицированной модели данных ресурсов Менеджер ресурсов хранит все атрибуты, составляющие модель ресурсов, такие как максимальная полезная нагрузка, минимальная скорость, местоположение, конфигурация преобразования (.urdf), конфигурация пути (.yaml) и движения (.srdf) и т.д.

Два подкомпонента отвечают за мониторинг состояния и местоположения каждого мобильного ресурса в режиме реального времени и обновление в онлайн-режиме фактических значений в модели ЦД.

На рис. 2—4 представлены модели программных компонентов: Менеджера ресурсов (рис. 2), Менеджера датчиков (рис. 3), Конструктора 3D-среды (рис. 4).

Как показано на рис. 2, для каждого ресурса, транслирующего свои данные в режиме реального времени, инициируются конкретные темы и службы ROS.

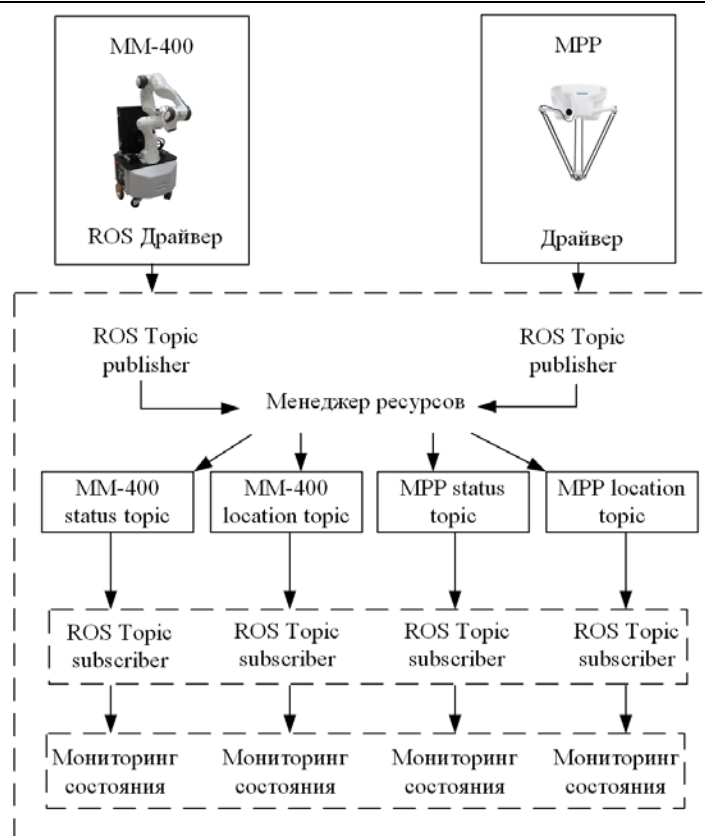


Рис. 2

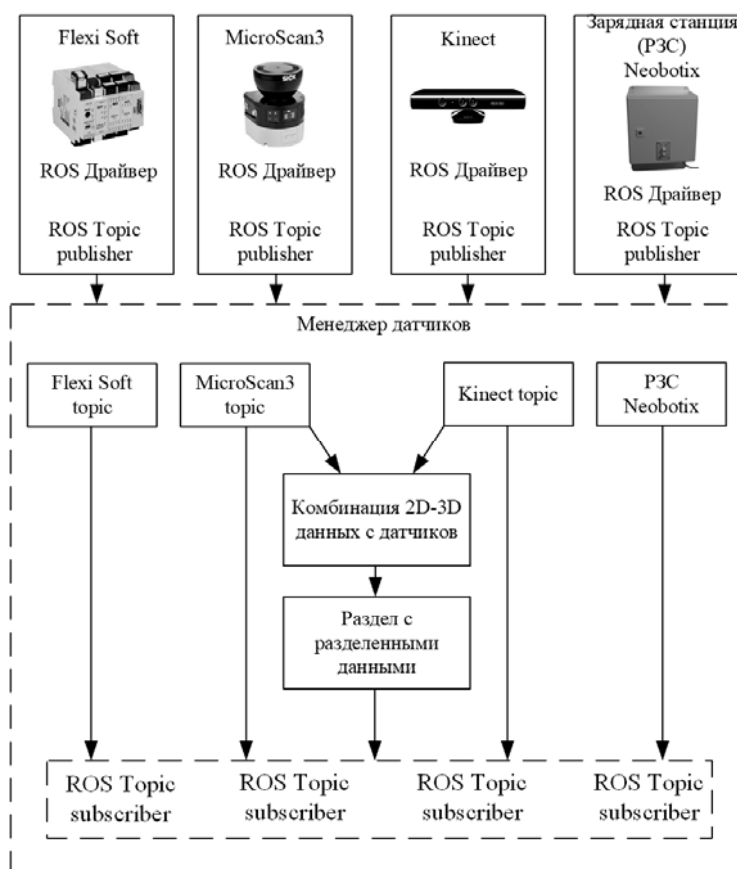


Рис. 3

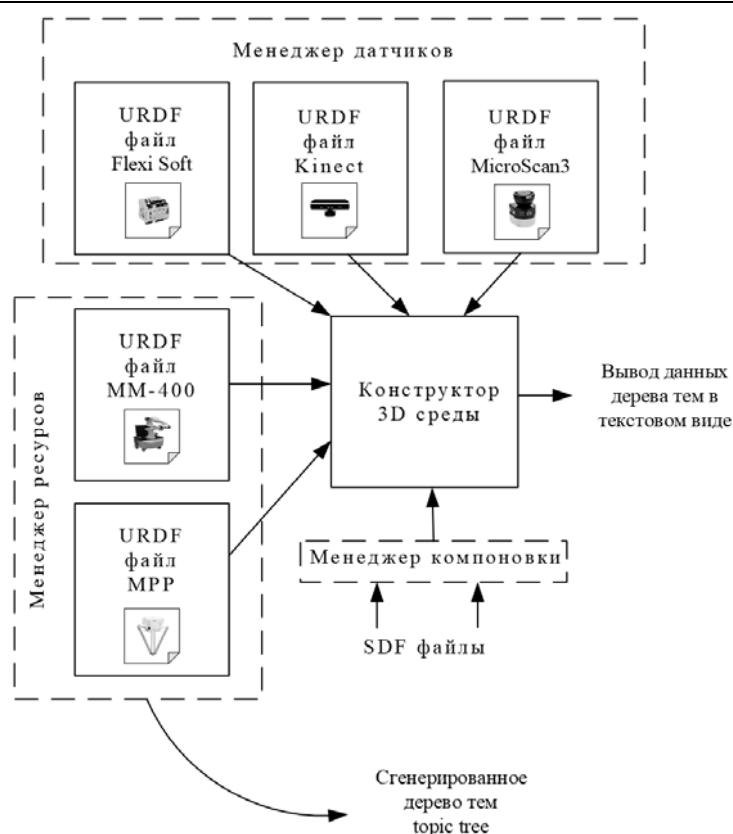


Рис. 4

Компонент Менеджер датчиков отвечает за взаимодействие датчиков с драйверами ROS и регистрацию их конфигурационных данных в хранилище ЦД с использованием унифицированного формата модели данных.

Все сенсорные данные становятся доступными для планировщиков роботов, если используются шаблоны topic/subscriber в качестве механизмов связи. Датчики однозначно определяются по их идентификаторам, сохраняя список соответствующих тем. Для облегчения использования стандартных алгоритмов планирования движения и траектории (например, gmapping, amcl, ompl) модуль комбинирования данных датчиков передает информацию Конструктору 2D—3D-среды, что позволяет динамически объединять информацию нескольких датчиков [10—12].

Для описания логики работы модели ЦД целесообразно разработать UML-диаграмму проекта, по которой в дальнейшем можно разработать программный код. UML-модели с помощью графических правил и синтаксиса позволяют визуализировать процесс функционирования системы, объединить все компоненты в единую структуру и вносить правки в процессе работы. В ходе разработки UML-модели возможно собрать как крупные, так и более мелкие детали системы и разработать каркас (схему) приложения. Предложенная диаграмма UML-модели цифрового двойника гибридной производственной сборочной линии светодиодных осветительных приборов представлена на рис. 5.

В рамках разработки модели ЦД необходимо предусмотреть также компонент Планировщик пути, содержащий алгоритм предотвращения столкновений между подвижными ресурсами гибридной сборочной линии и не нанесенными на карту препятствиями внутри цеховой среды. На данный момент существует достаточное количество алгоритмов с планировщиками траекторий для обеспечения онлайн-перепланирования на основе объединенной информации в режиме реального времени [13—15].

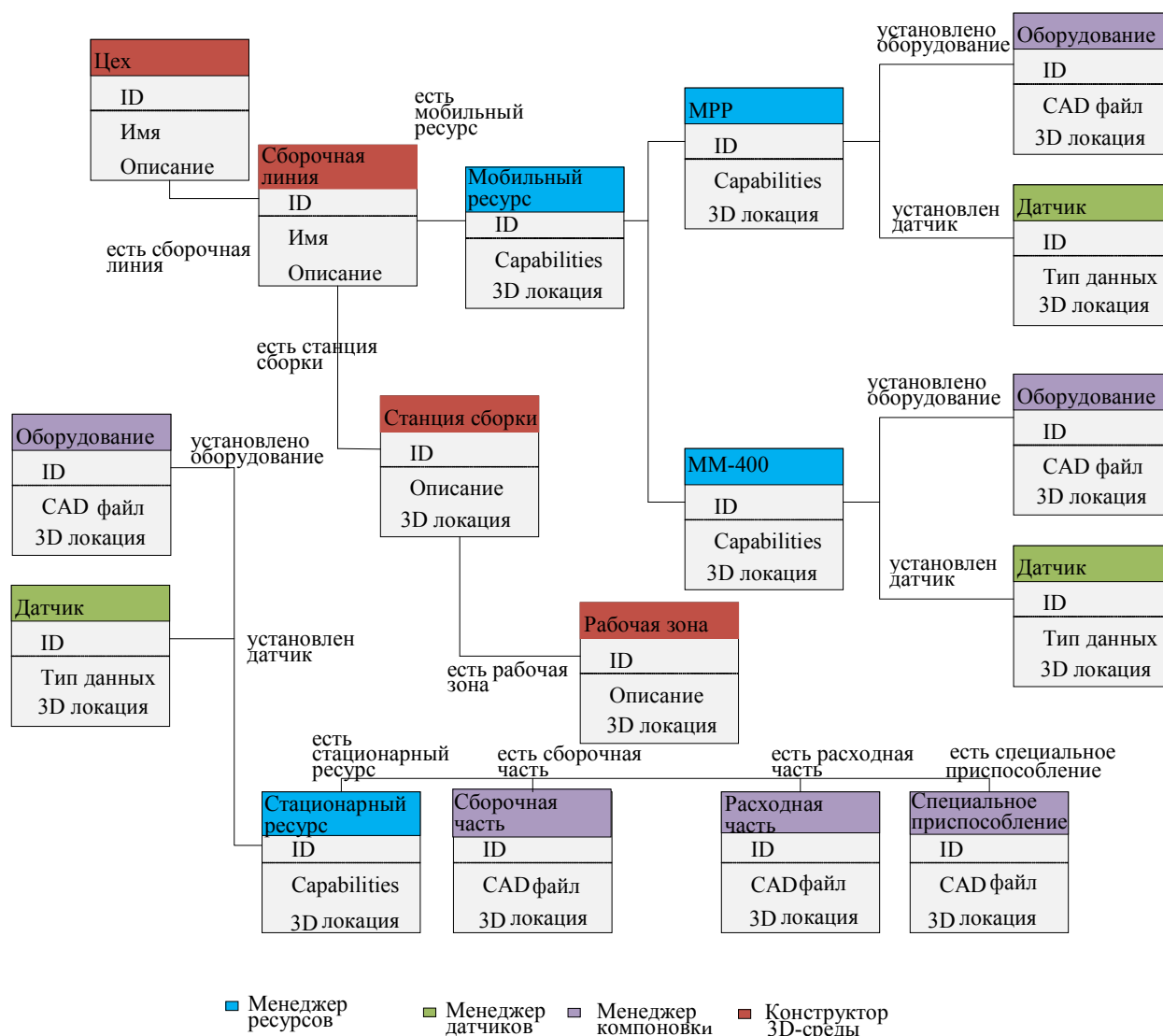


Рис. 5

Пример генерации плана траектории и плана движения на основе предоставляемых данных цифрового двойника с описанным оборудованием представлен на рис. 6.



Рис. 6

Интерфейс компонента Планировщик пути может быть основан на навигационном стеке ROS для мобильных роботов. Тогда в ЦД должны обеспечиваться:

- преобразование для каждой системы координат робота (система координат описывается в файле .urdf);
- получение сигналов и одометрической информации с датчиков расстояния, необходимых для отображения и локализации ресурса и для обхода препятствий;
- преобразование глобальной карты цеха (3D-карта) — этот компонент можно реализовать в сетке занятости с использованием библиотеки OctoMap и информации о препятствиях.

Предлагаемая модель ЦД производственной линии встраиваемых светодиодных осветительных приборов предполагает автоматизацию выполнения простых функций по сборке светодиодного светильника — установки рассеивателя, сортировки и складирования светильников и пр.

Разработанная концепция гибридной производственной линии основана на анализе, проведенном в [7], она предполагает использование как минимум одного робота типа MM-400, одного робота типа MPP, а также оператора.

Для эффективного выполнения сценария MM-400 должен воспринимать:

а) местоположение демпфера и движущегося приспособления в режиме реального времени, чтобы компенсировать ошибки локализации, которые невозможно предвидеть в автономном режиме, используя данные стереокамер `rs_visard`,

б) статические препятствия, движущихся людей,

в) данные, полученные с лазерного сканера.

Взаимодействие с оператором планируется осуществлять через устройство и библиотеку Kinect.

При выполнении описанных условий смоделированная инфраструктура ЦД может быть развернута с целью интеграции и обновления виртуального мира в режиме реального времени с помощью информации, поступающей от датчиков, искусственных препятствий для задания траектории и модулей обнаружения людей, то есть ЦД должен транслировать обработанную информацию роботам, для планирования траектории движения.

Для тестирования разработанной модели может быть настроен сценарий в движке физического моделирования, с этой целью могут быть использованы средства программного обеспечения с открытым кодом GAZEBO, которые являются свободно распространяемыми, или средства Unity Digital Twins, Unity Digital Planning (или аналогичные им).

Для корректной работы системы необходимо использование:

а) файлов САПР абстрактного цеха для представления макета;

б) виртуальных контроллеров ROS универсальных роботов;

в) данных двумерного лазерного сканера для создания 2D-карты;

г) данных имитированной стереокамеры для обнаружения виртуальных объектов;

д) реальных данных Kinect с целью сопоставления с физическими данными для тестирования взаимодействия человека и робота с помощью распознавания жестов.

Заключение. В работе представлена модель системы цифрового двойника, обеспечивающая инфраструктуру для интеграции всех аппаратных компонентов, необходимых при синтезе всех поступающих данных ЦД в единой общей цифровой среде. Для получения информации о цехе и сборочной линии каждый ресурс применяет методы познания.

Полученная модель, согласно описанной концепции технического решения, разрабатывалась для исследования гибридной сборочной линии светодиодных осветительных приборов.

Исходя из принципов унификации модели было предусмотрено, чтобы цифровой двойник позволял поддерживать множество случаев взаимодействия, включая мобильные и/или стационарные роботы, однорукие и/или многорукие манипуляторы, несколько типов датчиков (2D, 3D, F/T и т.д.) и операторов (людей). Внедрение цифрового двойника позволяет производственной системе компенсировать реальную неопределенность окружающей среды, а также непредсказуемость поведения человека. Таким образом, отпадает необходимость в автономном программировании и проверке движений робота, когда требуется внести изменения в технологический процесс, что сводит к минимуму необходимые время и усилия. Однако такая система демонстрирует более высокую сложность из-за увеличенного объема собираемых и обрабатываемых данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mittal S., Khan M. A., Romero D., Wuest T. Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2019. Vol. 233, N 5. P. 1342—1361.
2. Царев М. В., Андреев Ю. С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 7. С. 517—531.
3. Krüger J., Wang L., Verl A., Bauernhansl T., Carpanzano E., Makris S., Fleischer J., Reinhart G., Franke J., Pellegrinelli S. Innovative control of assembly systems and lines // CIRP Annals of Manufacturing Technology. 2018. Vol. 66. P. 707—730.
4. Боровков А. И., Рябов Ю. А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки // Цифровая трансформация экономики и промышленности: Сб. тр. науч.-практ. конф. с зарубежным участием. 20—22 июня 2019 г. СПб: Политех-Пресс, 2019. С. 234—245. DOI:10.18720/IEP/2019.3/25.
5. Дорожная карта развития „сквозной“ цифровой технологии „Новые производственные технологии“ [Электронный ресурс]: <<https://digital.gov.ru/ru/documents/6662>>. (06.06.2022)
6. Garfinkel J. Gartner Identifies the Top 10 Strategic Technology Trends for 2019 // Gartner Tech. Rep. 2018 [Электронный ресурс]: <<https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-10-15-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>>.
7. Операционная система робота [Электронный ресурс]: <<http://www.ros.org>>.
8. Kousi N., Michalos G., Aivaliotis S., Makris S. Overview of Future Assembly Systems Introducing Two-Armed Robotic Mobile Workers // 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS 2018). Stockholm, Sweden, 16—18 May 2018.
9. Huang S., Wang G., Yan Y., Fang X. Blockchain-based data management for digital twin of product // Journal of Manufacturing Systems. 2020. Vol. 54. January. P. 361—371. DOI:10.1016/j.jmsy.2020.01.009.
10. Афанасьев М. Я., Федосов Ю. В., Крылова А. А., Шорохов С. А. Применение машинного зрения в задачах автоматического позиционирования инструмента модульного оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 9. С. 830—839.
11. Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A. Enabling technologies and tools for digital twin // Journal of Manufacturing Systems. 2021. Vol. 58, Pt. B. January. P. 3—21. DOI:10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
12. Schluse M., Priggemeyer M., Atorf L., Rossmann J. Experimentable digital twins—Streamlining simulation-based systems engineering for Industry 4.0 // IEEE Trans. Ind. Information. 2018. Vol. 14, N 4. P. 1722—1731. DOI:10.1109/TII.2018.2804917.
13. Dasbach T., Zancul E., Schützer K., Anderl R. Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era // PLM 2019. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham, Springer, 2019. Vol. 565. P. 283—292. DOI:10.1007/978-3-030-42250-9_27.
14. Захаров В. В., Ушаков В. А. Динамический подход к планированию модернизации автоматизированных систем управления производственными объектами // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 6. С. 585—588.
15. Mrugalska B., Zasada B., Wyrwicka M. K. Preventive Approach to Machinery and Equipment Maintenance in Manufacturing Companies // Advances in manufacturing, Production Management and Process Control. 2019. Vol. 793. P. 540—548.

Сведения об авторах

Владимир Павлович Кузьменко

— канд. техн. наук; СПбГУАП, кафедра электромеханики и робототехники; старший преподаватель; E-mail: mr.konnny@gmail.com

Сергей Валентинович Солёный

— канд. техн. наук, доцент; СПбГУАП, кафедра электромеханики и робототехники; заведующий кафедрой; E-mail: ssv555sv@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.06.2022; одобрена после рецензирования 14.07.2022; принята к публикации 31.08.2022.

REFERENCES

1. Mittal S., Khan M.A., Romero D., Wuest T. *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2019, no. 5(233), pp. 1342–1361.
2. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 7(64), pp. 517–531, DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531. (in Russ.)
3. Kruger J., Wang L., Werl A., Bauernhansl T., Carpanzano E., Makris S., Fleischer J., Reinhart G., Franke J., Pellegrinelli S. *CIRP Annals of Manufacturing Technology*, 2018, vol. 66, pp. 707–730.
4. Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. *Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki i promyshlennosti* (Digital Transformation of the Economy and Industry), Proceedings of a scientific and practical conference with foreign participation, June 20–22, 2019, St. Petersburg, 2019, pp. 234–245, DOI:10.18720/IEP/2019.3/25. (in Russ.)
5. <https://digital.gov.ru/ru/documents/6662>. (in Russ.)
6. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2018-10-15-gartner-identifies-the-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>.
7. <http://www.ros.org>. (in Russ.)
8. Kousi N., Michalos G., Aivaliots S., Makris S. *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS 2018)*, Stockholm, Sweden, May 16–18, 2018.
9. Sihan H., Guoxin W., Yan Y., Xiongbing F. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020, vol. 54, pp. 361–371, DOI:10.1016/j.jmsy.2020.01.009.
10. Afanasiev M.Ya., Fedosov Yu.V., Krylova A.A., Shorokhov S.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, no. 9(63), pp. 830–839, DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-9-830-839. (in Russ.)
11. Qi Q., Tao F., Hu T., Anwer N., Liu A., Wei Y., Wang L., Nee A. *Journal of Manufacturing Systems*, 2021, vol. 58, pt. B, January, pp. 3–21, DOI:10.1016/j.jmsy.2019.10.001.
12. Schluse M., Priggemeyer M., Atorf L., Rossmann J. *IEEE Trans. Ind. Information*, 2018, no. 4(14), pp. 1722–1731, DOI:10.1109/TII.2018.2804917.
13. Dasbach T., Zancul E., Schützer K., Anderl R. *PLM 2019. IFIP Advances in Information and Communication Technology*, Cham, Springer, 2019, vol. 565, pp. 283–292, DOI:10.1007/978-3-030-42250-9_27.
14. Zakharov V.V., Ushakov V.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2019, no. 6(62), pp. 585–588, DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-6-585-588. (in Russ.)
15. Mrugalska B., Zasada B., Wyrwicka M.K. *Advances in manufacturing, Production Management and Process Control*, 2019, vol. 793, pp. 540–548.

Data on authors

- | | | |
|-----------------------------|---|--|
| Vladimir P. Kuzmenko | — | PhD; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Electromechanics and Robotics; Senior Lecturer;
E-mail: mr.konnny@gmail.com |
| Sergey V. Solenyi | — | PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Electromechanics and Robotics; Head of the Department; E-mail: ssv555ssv@yandex.ru |

Received 30.06.2022; approved after reviewing 14.07.2022; accepted for publication 31.08.2022.